Impact balistique d'une balle OTAN 7.62 sur réservoir : expérimentation et simulation du coup de bélier

P. THEVENET

EADS France, Innovation Works, 12 rue Pasteur ; 92152 Suresnes

Résumé :

Cet article porte sur l'étude du coup de bélier dans les réservoirs d'aéronefs provoqué par l'impact d'une balle de petit calibre. Dans un premier temps, les phénomènes physiques sont appréhendés par la voie expérimentale sur des structures simplifiées remplies d'eau. Dans un second temps, le coup de bélier est traité par la simulation numérique avec le code de calcul Radioss permettant le couplage fluide – structure. Les résultats de calculs sont comparés à ceux des essais.

Abstract :

This paper is on the hydraulic ram occuring in tanks of aircrafts after impact of a small bullet. In a first time, the physical phenomena are studied through ballistic tests on simplified structures filled with water. In a second time, the hydraulic ram is treated by numerical simulation with the explicit code Radioss allowing the coupling between fluid and structure. The results of computations are compared with those of tests.

Mots clefs : couplage fluide - structure, réservoir, perforation balistique, coup de bélier, balle OTAN 7.62, essais, simulation numérique, méthode ALE.

1 Introduction

Le problème étudié, dans le cadre du projet européen Euclid RTP 3.32 « H-ram », concerne en premier lieu les avions militaires, en particulier leur vulnérabilité aux tirs de balles sur les parties structurales contenant du carburant, telles la voilure et certaines zones du fuselage. Cette vulnérabilité est due au phénomène du coup de bélier.

Un défi majeur est la simulation numérique de ce coup de bélier en vue d'analyser le comportement des structures pétrolisées et d'optimiser concepts tolérants à cette menace. La présence de fluide traversé par une balle solide confère un caractère multi-physique au problème. L'interaction fluide – structure est dominante. A cela on peut ajouter un caractère multi-échelle, compte tenu des dimensions et de la nature de la balle par rapport au réservoir, dont la complexité peut être accrue en présence de parois en matériaux composites. Dans un contexte industriel, le logiciel Radioss dans lequel EADS-IW développe des fonctionnalités spécifiques est utilisé.

Simuler numériquement est une chose, savoir reproduire les phénomènes physiques observés en est une autre. Pour démontrer que le problème peut être numériquement traité avec un niveau correct de corrélation, il est important de disposer au préalable de références expérimentales.

2 Expérimentation

Le but des essais balistiques est non seulement de constituer des références expérimentales mais aussi d'appréhender les phénomènes physiques par divers moyens de suivi. Ces essais ont été réalisés par l'ONERA/IMFL, partenaire du projet, sur des caissons simplifiés fabriqués par EADS-IW. Ceux-ci sont constitués de quatre parois périphériques très rigides dont deux sont transparentes, les deux autres étant les panneaux d'entrée et de sortie de balle espacés de 300 mm. Ces derniers sont soit métalliques soit en matériau composite. Tous les caissons sont emplis à 100% d'eau. Le projectile est une balle OTAN de calibre 7,62 mm, composée d'un noyau de plomb et d'une enveloppe de tombac. Elle est tirée verticalement

depuis un canon de fusil, sa vitesse au moment de l'impact sur le panneau d'entrée étant d'environ 880 m/s. Elle est par ailleurs animée d'une vitesse de rotation autour de son axe longitudinal, induite par les rainures du canon.

Le dispositif expérimental permet un suivi global du comportement des parois et du fluide par deux caméras numériques ultrarapides. Les panneaux d'entrée et de sortie sont munis de jauges de déformations. Un système Zimmer mesure le déplacement central hors plan du panneau de sortie. Deux tubes munis de capteurs sont immergés dans le fluide pour mesurer la pression à proximité de la trajectoire de balle. Enfin, sur une des parois transparentes est collé un papier translucide sur lequel est tracé un quadrillage régulier pour faciliter toute quantification.

La figure 1 illustre ce qui se produit dans le fluide, à partir d'une des caméras, pendant et après la perforation du panneau d'entrée, sur une durée d'environ 10 ms (une image toutes les 0,3 ms de 0,9023 ms à 2,427 ms puis toutes les 0,6 ms). Une onde de choc se propage dans l'eau à environ 1500 m/s suite à l'impact de la balle. Un volume de cavitation se forme ensuite sur le passage de la balle. Lorsque cette dernière est arrêtée par le panneau de sortie, ce volume continue de croître avant de s'effondrer puis se reformer. A certains instants, la dépression régnant dans des portions du volume d'eau provoque une dilatation des microbulles d'air installées au moment du remplissage.

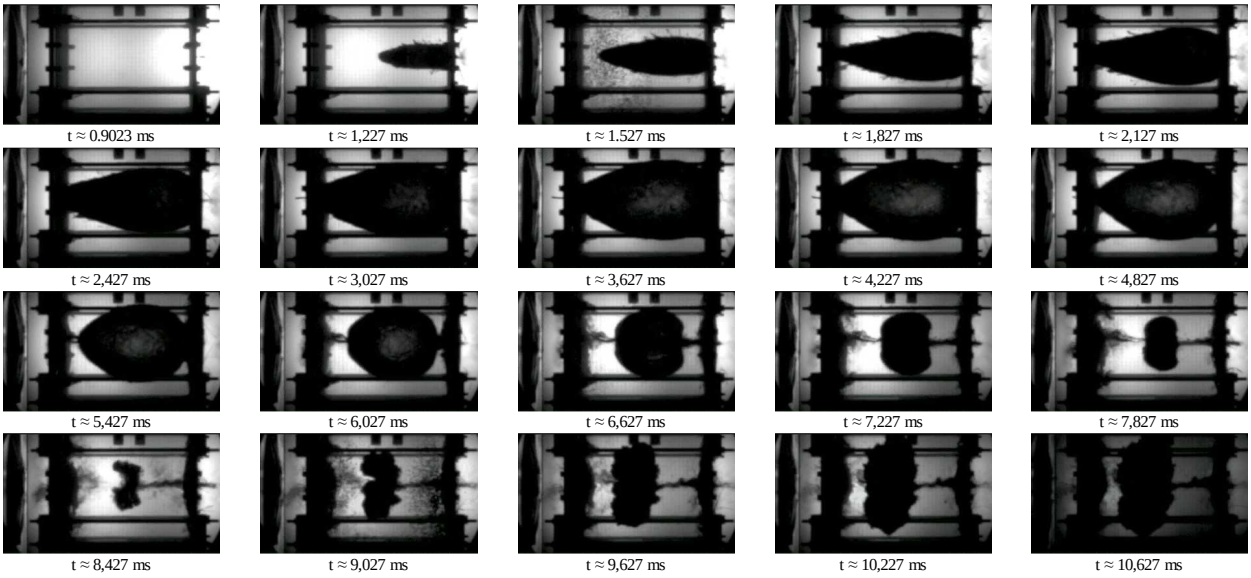

FIG. 1 – Progression de la balle et du volume de cavitation après la perforation du panneau d'entrée.

Les traitements d'images permettent d'évaluer la position du front de cavitation que l'on suppose correspondre au nez de la balle plus ou moins déformée et d'en déduire par dérivation la vitesse de progression (fig. 2-a) jusqu'à l'impact sur le panneau de sortie à environ 175 m/s. Les capteurs de pression (fig. 2-b) font état d'un pic à 50 bars (balle à hauteur des capteurs) puis à 25 bars (cavitation minimale).

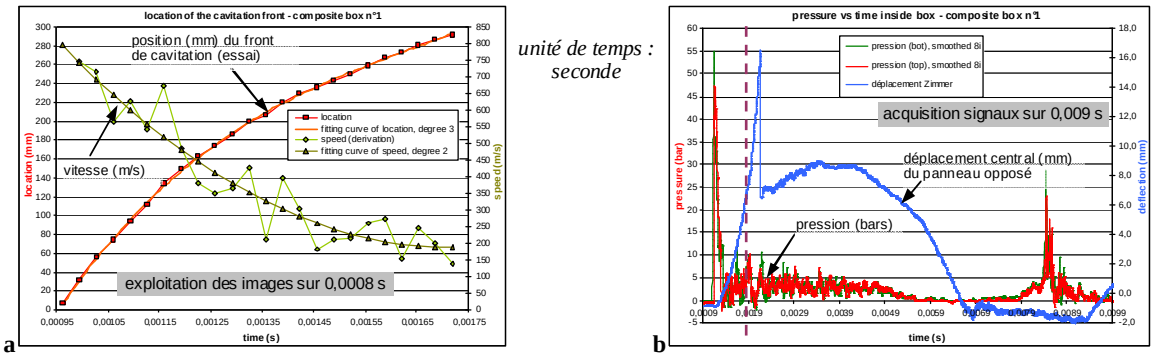

FIG. 2 – Exploitation des images pour position et vitesse dans le fluide (a) et des signaux de pression (b)

L'analyse détaillée des essais permet d'affirmer que l'onde de pression issue du choc de la balle sur le panneau n'est pas à l'origine des dégradations relevées post mortem. Ces dernières sont obtenues quand la balle traverse le fluide en générant les niveaux élevés de pression.

3 Modélisation et simulation

3.1 Choix de modélisation

Le problème est à la fois multi-physique et multi-échelle avec interaction entre tous les composants en présence : balle, fluide et caisson. Arbitrairement, la petite échelle est définie par la balle. Celle intermédiaire est définie par le panneau d'entrée ou de sortie. La grande échelle est le caisson complet avec l'eau.

La balle OTAN 7,62 utilisée pour les essais est standard avec une masse mesurée de 9,3 g et composée de deux parties (fig. 3-a) déformables et érodables. La modélisation tient compte de cet aspect avec une discrétisation classique par éléments finis (fig. 3-b) et des conditions de contact entre le noyau et l'enveloppe. Et à défaut de pouvoir caractériser sous chargement dynamique le plomb et le tombac (CuZn20), les données matériaux sont issues de la littérature [1] [2] [3]. Elles sont traduites dans Radioss sous forme de lois tabulées. L'érosion est obtenue par un critère en déformation maximale ($\varepsilon_{plas\_eq} = \varepsilon_{max}$).

FIG. 3 – Coupe longitudinale de la balle (a) et maillage EF associé (b)

L'exemple de référence traité par simulation est le caisson doté de panneaux métalliques. Ce choix est dicté par la disponibilité dans la littérature des données matériaux pour l'alliage d'aluminium 2024-T3 [4]. Les parois déformables du caisson sont discrétisées par des éléments finis volumiques lagrangiens. La perforation par balle est pilotée par un critère en déformation maximale aussi.

La pertinence des choix précédents est vérifiée au travers d'une simulation de la perforation comparée à un tir balistique sur une simple plaque (fig. 4) réalisé par l'ONERA/IMFL. La vitesse mesurée avant impact est de 880 m/s, la balle ayant un angle de tumbling entre 4 et 5°. Celui-ci est conservé après la perforation, la vitesse résiduelle s'établissant à 797 m/s. Selon les réglages faits sur les coefficients de frottement entre balle et plaque et la déformation maximale de l'alliage, la vitesse résiduelle calculée encadre la valeur expérimentale avec des bornes de 786 et 804 m/s. L'angle de tumbling est par ailleurs maintenu. Plus qualitativement (fig. 4), le noyau de plomb subit une érosion constatée aussi expérimentalement, l'enveloppe étant par contre davantage dégradée. Enfin, on constate aussi un bourrelet de matière autour du trou.

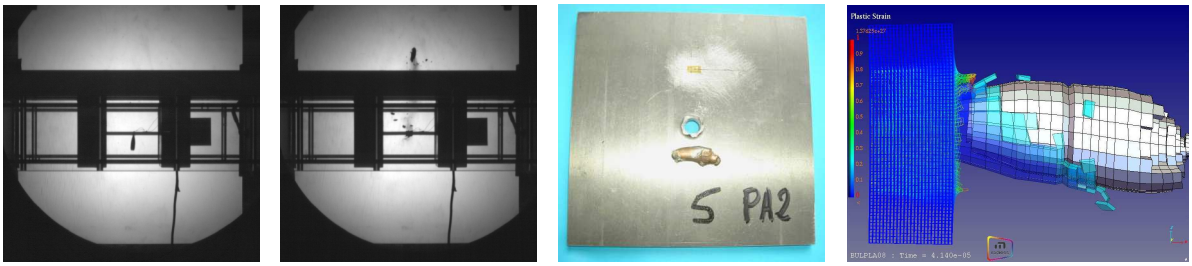

FIG. 4 – Tir balistique sur simple plaque en alliage 2024-T3, état après tir, simulation de la perforation

La partie la plus délicate de la modélisation concerne le fluide. Plus précisément, l'interrogation porte sur comment faire interagir balle et fluide, mais aussi caisson et fluide. On pourrait envisager une description lagrangienne de type SPH (smooth particles hydrodynamics) pour le fluide. Compte tenu du grand volume du caisson, une discrétisation intégrale en SPH du fluide est exclue. Une alternative serait de considérer seulement un tunnel SPH sur la trajectoire de la balle, le reste du fluide recevant un maillage classique lagrangien et la jonction entre les deux zones étant établie par l'interface adéquate dans Radioss. Ce qui apparaît le plus adapté est l'usage d'un maillage ALE (arbitrary lagrangian eulerian) pour le fluide qui peut

être traversé par la balle et interagir avec cette dernière grâce à une toute nouvelle interface de contact (type 18 [5]). Celle-ci requiert l'usage d'une partie maître (balle) et d'une partie esclave (fluide) auxquelles s'ajoutent des réglages délicats en rigidité et distance de contact. Au domaine fluide interne est affectée une loi bi-phasique avec effet de compressibilité pour l'eau (loi 37 [5]). Le passage d'une phase à l'autre est régi par les équations d'état. Avant perforation, la balle est immergée dans un domaine gazeux (air) jouxtant le domaine liquide (fig. 5-a). Ce dernier est discrétisé finement sur toute la trajectoire. En périphérie de ce domaine, des conditions de liaison avec les parois du caisson sont attribuées. La fixation du caisson sur le dispositif expérimental est reproduite par des conditions de blocage. La figure 5-b présente deux vues globales du maillage complet du caisson.

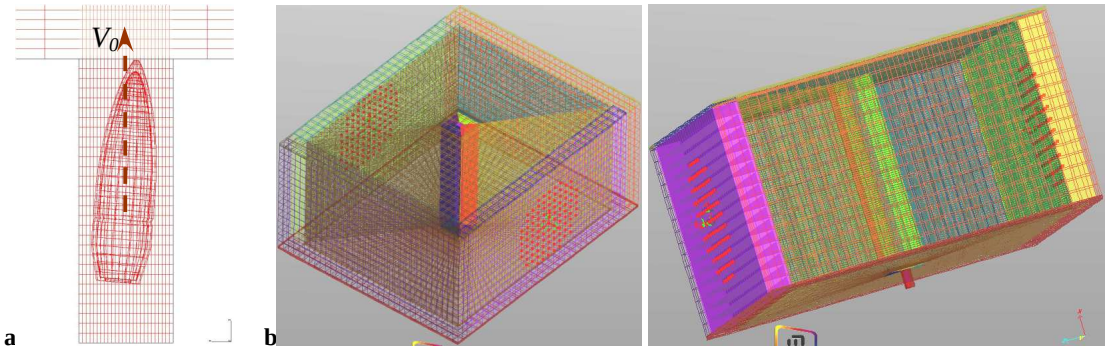

FIG. 5 – Vue locale du maillage de la balle et du volume d'air (a), vue globale du maillage du caisson (b)

3.2 Simulation et comparaison

La simulation est déroulée pour une trajectoire de balle de 180 mm. La figure 6 établit une comparaison entre les positions de la balle et de l'onde de choc restituées par le calcul et l'essai (traitement des 32 images acquises par caméra haute définition). Il y a concordance pour l'onde de choc qui est réfléchie, selon l'essai, vers 0.21 ms. Par contre, au delà de 0.10 ms, la position de la balle diverge par rapport à celle du front de cavitation : malgré sa dislocation (fig. 7), les fragments progressent trop vite.

Le champ de pressions au sein du fluide, dans un plan médian vertical du caisson, est présenté sur la figure 7 pour toutes les 0.02 ms à partir du début de l'impact sur le panneau. Le seuil maxi est réglé à 60 bars, le seuil mini à -0.001 bar. Dans les premiers instants de pénétration dans l'eau, la pression locale devant le nez de la balle érodée dépasse les 60 bars. Ce niveau élevé est confirmé qualitativement par l'observation expérimentale : distorsion locale de la grille due à une modification de l'indice de réfraction de l'eau sous forte pression. Cette surpression décroît quand la balle progresse et se fragmente. Elle est précédée par l'onde de choc. Dans le sillage de la balle se forme une zone de cavitation au diamètre croissant.

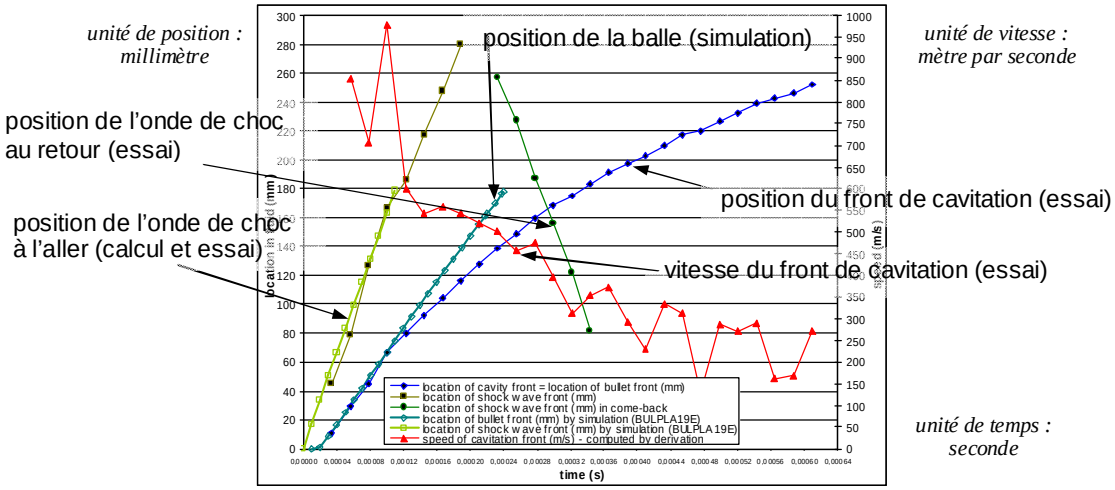
unité de position : millimètre
position de la balle (simulation)
unité de vitesse : mètre par seconde
position de l'onde de choc au retour (essai)
position de l'onde de choc à l'aller (calcul et essai)
position du front de cavitation (essai)
vitesse du front de cavitation (essai)
location of cavity front = location of bullet front (mm)
location of shock wave front (mm)
location of shock wave front (mm) in come-back
location of bullet front (mm) by simulation (BULPLA19E)
location of shock wave front (mm) by simulation (BULPLA19E)
speed of cavitation front (m/s) - computed by derivation
time (s)
unité de temps : seconde

FIG. 6 – Comparaison des positions temporelles du front d'onde de choc, de la balle et du front de cavitation

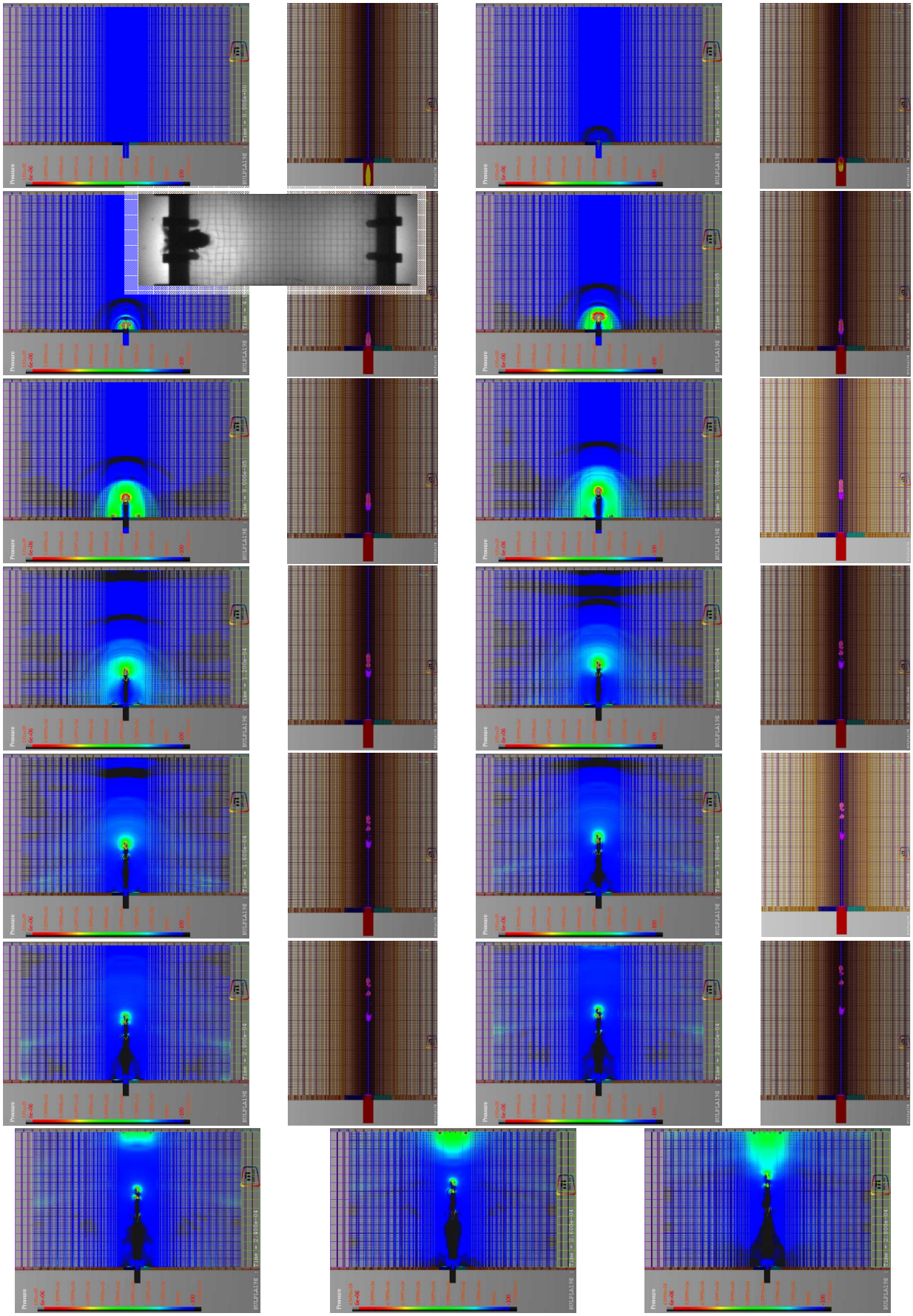

FIG. 7 – Champ de pressions dans le fluide (plan médian du caisson) et fragmentation de la balle, 1ère partie

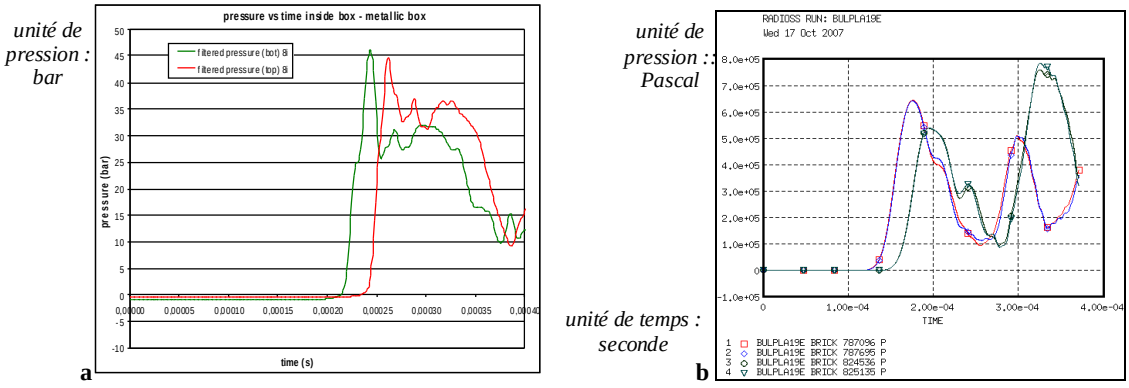

FIG. 8 – Comparaison des pressions restituées par les capteurs (a : essai, b : simulation)

Les signaux de pressions restituées par les capteurs sont comparés sur la figure 8. Il y a divergence en temps et en amplitude : le premier pic est à environ 0.17 ms contre 0.23 ms avec une amplitude de 6,4 bars contre 45 bars. Le décalage temporel est dû à une balle disloquée qui progresse plus vite qu'au cours de l'essai. La différence de pression peut s'expliquer par un manque d'interaction entre la balle et l'eau à ce stade de la simulation. Ceci peut nécessiter un travail plus approfondi sur les réglages de l'interface de contact entre solide et fluide.

4 Conclusion

Les essais sur caissons simplifiés avec les différents moyens de suivi permettent d'établir le scénario des évènements se déroulant en balistique terminale. L'onde de choc, consécutive à l'impact de la balle sur le panneau, est au cours de sa propagation dans le fluide sans conséquence sur l'intégrité du réservoir. Par contre, les effets destructeurs sont obtenus quand la balle traverse le fluide en générant de hauts niveaux de pression. La vulnérabilité est la plus grande quand le réservoir est entièrement rempli. Il faut par ailleurs souligner l'apport de l'imagerie dans l'analyse des essais. A posteriori, on constate que certaines images hautes définitions pourraient être exploitées d'une certaine façon pour déterminer les niveaux de pression devant le front de cavitation.

Même si tous les résultats de simulation ne corrèlent pas parfaitement avec ceux des essais, ils montrent au moins que la modélisation proposée constitue une base de travail qui doit être améliorée tout en reposant sur les fonctionnalités disponibles dans le code Radioss. Une marge de progression paraît possible en affinant les réglages de l'interface de contact entre solide et fluide et en adoptant un maillage plus fin pour ce dernier sur la trajectoire de la balle. Malgré l'usage d'un critère simplifié pour l'érosion de la matière, la perforation est assez bien reproduite puisqu'on parvient à obtenir la bonne vitesse résiduelle. Il reste néanmoins une incertitude sur les lois de comportement concernant les matériaux de la balle. Les données issues de la littérature nécessiteraient une vérification.

Références

[1] Vilkauskas A., summary of doctoral dissertation : research and simulation of ballistics processes of small arms ammunition bullets, Kaunas University of Technology, Lithuania, 2005.
[2] Abdennadher S. et Zhao H (LTM Cachan), modélisation du mécanisme d'inertie dans le flambage progressif de tube, 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice 2003.
[3] Gruenenwald T., Llorca F et Farre J. (CEA, Centre de Valduc), a modeling of visco-plastic behavior of lead and a lead alloy over a wide range of strain rate and temperature, Eurodymat 2003, Journal of Physics IV France 110, 2003.
[4] Lesuer D. R. (FAA), experimental investigations of materials for Ti-6Al-4V titanium and 2024-T3 aluminium, rapport final DOT/FAA/AR-00/25, septembre 2000.
[5] Manuel d'utilisation RADIOSS STARTER Version 5.1, janvier 2007.

Remerciements

EADS-IW remercie la DGA pour le soutien financier du projet Euclid RTP 3.32 et l'ONERA/IMFL (Jacky Fabis) partenaire du projet pour la réalisation des essais balistiques.